

COMPTE-RENDU DU CONSEIL SCIENTIFIQUE DU LPSC 30 mai – 1er juin 2024

Rapport sur les activités du LPSC au LSM

Présents : Johan Bregeon, Benoit Clément, Laurent Derome, Fabienne Ledroit-Guillon, Marie-Hélène Genest, Delphine Hardin, Nicolas Leroy, Juan Macías-Pérez, Jean-Sébastien Réal, Nadine Sauzet, Patrice Verdier, Ana Teixeira

Absents : David Brasse

Le LSM et ses activités

Le Laboratoire souterrain de Modane, situé sous 1700 m de roche au milieu du tunnel du Fréjus, bénéficie d'un environnement à très bas bruit en termes de rayons cosmiques et de radioactivité ambiante. La surface disponible dans le hall expérimental principal est de l'ordre de 400 m², ce qui est trop petit pour héberger la prochaine génération d'expérience de détection de neutrinos ou de matière noire, mais est idéal en revanche pour accueillir les prototypes de ces expériences en phase finale de R&D (e.g. SuperNemo actuellement). Le LSM est aussi adapté à la nouvelle génération de détection cryogénie pour la recherche à basse masse pour laquelle les détecteurs sont de taille moyenne (TESSEACT).

Le LSM est aujourd'hui une plateforme technique nationale dont la direction, récemment renouvelée, est assurée par Silvia Scorza (directrice scientifique) et Nadine Sauzet (directrice technique). Le conseil scientifique note en particulier la volonté affichée de mettre en place une programmation détaillée du cycle de vie de chaque expérience hébergée qui permettra à la plateforme de clarifier les responsabilités entre les expériences et le laboratoire et d'optimiser sur le moyen terme la capacité et la qualité de l'accueil tout en gérant au mieux les activités du personnel local.

Le projet RICOCHET

RICOCHET est une expérience sur la détection de la diffusion élastique cohérente neutrino-noyau (CENNS) en phase finale d'installation auprès du réacteur nucléaire de l'Institut Laue Langevin (ILL). Prédite il y a plus de 40 ans, la détection de la CENNS en 2017 à Oak Ridge, a ouvert la voie à un grand nombre d'expériences visant des mesures de précision. En effet, une mesure précise du spectre en énergie des reculs nucléaires produits par l'interaction de neutrinos de basse énergie (<10 MeV) dans le détecteur fournira des informations sur l'existence de neutrinos stériles ou de nouveaux bosons massifs. L'étude de la CENNS est également cruciale pour les expériences futures de recherche directe de matière noire car elle représente le bruit de fond ultime et irréductible («neutrino floor »).

RICOCHET est une collaboration internationale (France, Etats-Unis, Russie) comptant environ 80 membres. L'expérience RICOCHET emploie des détecteurs cryogéniques à semi-conducteur dont la technologie a initialement été développée en France ces 20 dernières années, notamment pour l'expérience EDELWEISS au Laboratoire Souterrain de Modane. Ces détecteurs effectuent une double mesure (chaleur-ionisation) permettant la discrimination entre le recul nucléaire et le recul des électrons, et par conséquent la discrimination entre le signal et le bruit de fond.

Les équipes françaises sont soutenues par un programme ERC « CENNS » (IP2I Lyon) et un financement ANR, « RICOCHET », porté par un membre de l'équipe du LPSC Grenoble.

Conclusions RICOCHET

Le CS félicite l'équipe du LPSC pour ses travaux et ses responsabilités prises sur la conception et la réalisation du blindage passif, sur les campagnes menées pour la validation du niveau de bruit de fond et sur l'ensemble des travaux de simulations qui ont permis de valider le programme d'installation du détecteur à l'ILL. Le LPSC joue un rôle essentiel dans l'installation et le fonctionnement de cette expérience. L'installation à l'ILL et le démarrage du commissioning sont des succès et parfaitement dans les temps ; RICOCHET devrait donc être en mesure de détecter la CENNS après un cycle de fonctionnement de l'ILL (50 jours) en 2025 et d'effectuer des mesures de précision après 7 cycles, soit d'ici la fin de l'année 2026.

Le CS encourage l'équipe du LPSC à expliciter de manière plus détaillée son programme de physique sur la mesure de la CENNS, la recherche de nouvelle physique, et le développement de collaborations avec des théoriciens.

Le CS recommande un suivi du projet RICOCHET par le CS fin 2025-début 2026 afin d'évaluer les performances, les résultats obtenus et les éventuelles prolongations au-delà de 2026. Il sera à ce moment-là crucial d'arbitrer d'éventuelles demandes de R&D RICOCHET qui pourraient entrer en conflit avec les développements pour la préparation de TESSERACT. A noter que les financements de RICOCHET, en cours par l'ANR et l'ERC, s'achèvent en 2024.

Le projet TESSERACT

TESSERACT (« Transition Edge Sensors with Sub-ev Resolution And Cryogenic Targets ») est une proposition d'expérience de recherche directe de matière noire dans la gamme de masse $1 \text{ meV}/c^2$ - $1 \text{ GeV}/c^2$. Elle est basée sur des détecteurs cryogéniques innovants constitués de « Transition Edge Sensors » (TES) utilisés dans un environnement avec un très faible niveau de bruit de fond environnemental. La nature de la matière noire est une énigme majeure pour la compréhension du contenu de l'Univers et des constituants élémentaires de la matière. Sa recherche dans toute la gamme de masse possible, en étendant notamment les régions sondées sous le paradigme WIMP,

est une priorité très élevée identifiée dans les prospectives nationales en physique des particules et astroparticules.

Les détecteurs cryogéniques de dernière génération visant l'observation de la matière noire avec des seuils inférieurs à 100 eV sont limités par un bruit à basse énergie dont l'origine est à ce jour inconnue (relaxation thermique ou de stress aux interfaces). Un des objectifs de TESSERACT est d'identifier cette source de bruit ou de développer les technologies pour la rejeter.

TESSERACT est portée par une collaboration scientifique essentiellement américaine (40 personnes et 8 laboratoires), financée par le programme « Dark Matter New Initiative » du DoE depuis 2020, que trois laboratoires IN2P3 viennent de rejoindre : IJCLab, IP2I, LPSC. La collaboration est à la recherche d'un site et le LSM, avec son très faible niveau de bruit de fond environnemental, a été proposé pour héberger cette expérience.

L'objectif des équipes IN2P3 est de développer une nouvelle technologie hybride de détecteurs cryogéniques Germanium/Silicium, pouvant être opérés à basse et à haute tension de polarisation, optimisée respectivement pour la détection du recul nucléaire et du recul des électrons, ceci afin d'exploiter les trois processus d'interaction de la matière noire avec la matière ordinaire : la collision élastique sur le noyau nucléaire, la collision élastique sur les électrons, et l'absorption.

Afin de discriminer un potentiel signal de matière noire du bruit de fond résiduel, cette nouvelle génération de détecteur accueillera, dans son mode basse tension, une électronique d'amplification à base de HEMT (« High Electron Mobility Transistor »), développé par le laboratoire C2N, directement sur son support cryogénique à 100 mK afin d'effectuer une double mesure chaleur et ionisation avec des performances ultimes (comme démontré avec RICOCHET), i.e. avec une résolution en ionisation d'une paire électron-trou. Dans son mode haute tension, un nouveau senseur quantique SSED (« Superconducting Single Electron Detector ») sensible à l'électron unique, développé dans le cadre de l'ANR CryoSel, permettra le rejet des bruits de fond dominants liés aux relaxations thermiques et ne produisant aucune charge électrique dans les matériaux semi-conducteurs jusqu'aux plus basses énergies. L'utilisation de TES, optimisés pour la détection de phonons athermiques, permettra d'atteindre des seuils de détection de quelques centaines de meV.

La collaboration TESSERACT a pour objectif d'installer au LSM deux cryostats à dilution capables d'atteindre une température de 7 mK ainsi que leur environnement en termes de salle blanche et de blindage. Ces cryostats permettront d'accueillir la technologie de détecteur Ge/Si développée à l'IN2P3, ainsi que celles développées par l'Université de Berkeley.

Dans le cadre de ce projet, les groupes français se proposent de concevoir, financer et construire le premier des deux cryostats de TESSERACT avec son environnement dédié de basse radioactivité. Depuis 2023, TESSERACT est fortement soutenu par l'IN2P3. Il bénéficie désormais d'un financement à hauteur de 3,4 M€ dans le cadre du programme de projets à risque du CNRS : en plus de l'installation du premier cryostat au LSM, ce

projet TES4DM vise la démonstration d'une double mesure chaleur/ionisation sur un cristal de 1 cm³ de germanium à 10 mK.

Les responsabilités que le LPSC prévoit de prendre sont les suivantes :

- une implication dans la définition du setup de TESSERACT au LSM (salle blanche, blindage, cryostat), porté par le BE Méca du SERM ;
- une implication sur le développement de la technologie haute tension de TESSERACT CryoSel ;
- une implication sur la technologie basse tension dont les premiers designs (simulation COMSOL, dessins CATIA, ...) en s'appuyant sur l'expertise acquise sur les développements du détecteur CryoCube de Ricochet.
- une implication en électronique, encore à définir.

Conclusions TESSERACT

Le CS félicite les équipes du LPSC et du LSM pour leur contribution à la définition du projet TESSERACT. Il s'agit d'une opportunité de tout premier plan pour installer au LSM une expérience compétitive au niveau mondial pour la recherche de matière noire.

L'ensemble du projet TESSERACT présente un calendrier très agressif visant des premiers résultats sur la recherche de matière noire au bout de 4 ans. **Le CS recommande** à l'équipe du LPSC de veiller au phasage des objectifs et des jalons de démonstration dans le cadre de la phase préparatoire (TES4DM) vs ceux à plus long terme pour la phase de physique. Le calendrier actuel de TESSERACT suppose que les activités de l'équipe du LPSC sur RICOCHET basculeront presque intégralement sur TESSERACT en ~2026. **Le CS recommande** un suivi minutieux des évolutions des calendriers de ces 2 projets dans les 2 années à venir. Ceci passe par la mise en place et l'utilisation d'outils de management projet permettant d'organiser les axes de R&D et de piloter l'installation au LSM pour l'ensemble de la contribution IN2P3 (IJCLab, IP2I, LPSC et LSM).

Le CS encourage l'équipe du LPSC à développer et à expliciter dans les 2 années à venir son programme d'exploitation scientifique sur la recherche de matière noire.

Le CS relève par ailleurs le fort potentiel scientifique présent dans la connexion potentielle entre le bruit de fond à basse énergie et le problème de contamination des q-bits par les quasiparticules qui limite le temps de cohérence des ordinateurs quantiques. Une collaboration fructueuse avec des experts en la matière pourrait être mise en place.

Le projet MIMAC

Le projet MIMAC (*Micro-tpc Matrix of Chambers*), initié par D. Santos, il y a maintenant près de 20 ans, a pour objectif la détection directionnelle de particules de matière noire

via la mesure du recul des noyaux par interaction élastique dans un mélange gazeux à basse pression.

La détection directionnelle de matière noire présente un avantage théorique indéniable sur la concurrence en raison de la corrélation attendue entre la provenance du signal et le déplacement de la Terre dans le halo local de matière noire. Sa mise en œuvre est cependant complexe en raison de la faiblesse et de la rareté des signaux attendus, qui impliquent le développement d'un détecteur très spécifique permettant la reconstruction de traces en 3 dimensions à des énergies de l'ordre du keV.

Prototypes bi-chambres 10x10 cm² et 35x35 cm²

Le premier prototype à deux chambres de 10x10 cm², développé au LPSC, a pris des données à Modane dans sa version initiale de 2018 à 2022. Cette prise de données a mené à la publication des premières traces montrant la possibilité de la reconstruction 3D. Le détecteur de ce prototype bi-chambre a ensuite été mis à jour dans une nouvelle version à bas bruit qui a été installée à Modane en février 2023 et qui a pu prendre des données de grande qualité pendant plusieurs mois. Cette dernière prise de données a permis la finalisation de la validation technique de la chambre « 10 cm », la démonstration des performances avec un seuil en énergie très bas (< 1 keV), la stabilité du prototype en opération et de nouveau la possibilité de reconstruire les traces en 3D. L'analyse de l'ensemble des données est encore en cours, et implique notamment la validation des résultats via la réalisation d'une analyse indépendante qui doit être faite par un postdoc basé en Chine, qui ne travaille malheureusement pas officiellement sur le projet bien qu'étant accompagné par Charling Tao (collaboratrice du CPPM).

Pour la chambre « 10 cm », **le CS félicite** les équipes pour l'immense travail nécessaire durant de nombreuses années pour obtenir un détecteur performant et stable, capable de prendre des données pendant plusieurs mois. **Le CS encourage** très fortement le projet à converger sur l'analyse de l'ensemble des données existantes et à **publier** les résultats techniques, les performances du détecteur et l'étude du bruit de fond résiduel, ce afin de démontrer que MIMAC est aujourd'hui un détecteur directionnel stable et performant parmi les plus abouti au monde, et **ceci avant de passer à toute autre étape du projet.**

Un nouveau prototype bi-chambre 35x35 cm², comptant 2x896 canaux est en cours de mise au point, bénéficiant à la fois d'un financement du labex ENIGMASS à hauteur de 74 kEuros et de la collaboration avec l'USTC (University of Science and Technology of China, Hefei). Le détecteur est arrivé de Chine fin mai, les premiers tests sont actuellement en cours au LPSC et les premiers résultats sont très encourageants, notamment grâce à l'acquisition des premières traces en 3D. Un travail significatif de débogage, de validation technique et d'optimisation est prévu en laboratoire au LPSC ces prochains mois avant l'installation de la chambre à Modane en fin d'année. En 2025, la chambre devrait être améliorée avec l'intégration de la version bas bruit du Micromégas.

Pour la chambre 35 cm, **le CS recommande** de se focaliser sur la validation technologique, la démonstration de la maturité du détecteur, puis de ses performances.

En ce sens, l'envoi à Modane ne saurait être envisagé avant la finalisation de la mise au point de l'électronique de lecture, et l'obtention d'un système stable pouvant fonctionner avec un minimum d'interventions. Idéalement, les résultats des tests menés au LPSC seront publiés rapidement avec pour objectif de montrer que cette nouvelle brique élémentaire est à la disposition de la communauté internationale pour construire un détecteur de taille conséquente à même de repousser les limites de détection directe de la matière noire.

COMIMAC (NEWS-G)

La recherche de signaux de basse énergie ($E < 10$ keV) dus au recul des noyaux présente une complexité supplémentaire provenant de l'incertitude sur les facteurs de *quenching* de processus d'ionisation et de scintillation, soit la réduction de la quantité de lumière générée pour un dépôt d'énergie donné.

L'équipe a mis au point le banc de test COMIMAC qui permet la mesure in-situ du facteur de *quenching* du processus d'ionisation dans un gaz enfermée dans une sphère de cuivre pur de 30 cm de diamètre (sphère Sédine) couplée à une source à plasma.

Ce système transportable a notamment été utilisé par l'expérience NEWS-G durant son processus d'étalonnage pour la mesure du facteur de *quenching* de H dans son gaz CH₄. Les premiers résultats de NEWS-G, y compris ses limites d'exclusion sur les sections efficaces d'interaction des WIMPs, seront basés sur les mesures réalisées avec COMIMAC et devraient être soumis sous peu à la revue PRL.

Le CS félicite l'équipe pour le développement de ce banc de mesure des facteurs de *quenching* qui constitue un apport significatif à une problématique globale rencontrée par l'ensemble de la communauté internationale.

Le CS recommande la publication des détails de la réalisation et du fonctionnement du banc de test COMIMAC dans sa version actuelle, notamment pour ce qui concerne la précision des mesures via l'utilisation de la sphère Sédine.

MIMAC FastN

MIMAC FastN est un détecteur transportable pour la spectroscopie directionnelle des neutrons épithermiques. MIMAC FastN a été mis en place sur la ligne de neutron GENESIS du LPSC et sur la ligne de métrologie du NPL au Royaume-Uni, démontrant sa capacité à réaliser une mesure précise du spectre des neutrons épithermiques de 1 à 15 MeV du faisceau.

MIMAC FastN a aussi permis de caractériser les faisceaux de neutrons mono-énergétiques de basse énergie 8 keV et 27 keV, de la ligne de métrologie neutronique AMANDE de l'IRSN à Cadarache. Cyprien Beaufort, doctorant de 2019 à 2022, a démontré en analysant ces données que la résolution de la reconstruction de l'énergie des neutrons est de l'ordre de 4%, et la résolution angulaire de l'ordre de 15°, soit des performances tout à fait satisfaisantes validant le concept MIMAC.

Le CS comprend la démarche de l'équipe de vouloir fournir un système clé en main à l'IRSN pour la caractérisation de la ligne AMANDE, il est cependant indispensable que le suivi et la maintenance sur le moyen terme soit clairement définis. **Le CS recommande** à la direction du laboratoire de définir avec l'équipe MIMAC (y compris les services techniques impliqués) et les responsables de Cadarache quel doit être l'avenir du projet.

Conclusions MIMAC

Le **CS souhaite** saluer le travail de l'équipe et des services techniques qui ont réussi à développer un détecteur complexe et unique au monde pour la mesure directionnelle des particules de matière noire. L'expertise et les connaissances acquises par l'équipe font référence dans la communauté, il apparaît primordial de les préserver.

Pour ce faire, le **CS insiste** sur la nécessité de **publier** l'analyse des données existantes qui permettront de caractériser en profondeur les performances des détecteurs, et de documenter le design, la réalisation et le fonctionnement des différentes variantes de MIMAC pour la communauté. Cette publication est nécessaire avant de passer à une étape suivante du projet.

Le **CS recommande** que le laboratoire assure le maintien de l'expertise portée par les services techniques SDI et électronique sur la détection directionnelle et pouvoir participer dans l'avenir à un projet se construisant autour de la détection directionnelle au niveau national ou international.